



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 Offenlegungsschrift
10 DE 101 42 998 A 1

51 Int. Cl. 7:
B 32 B 15/01
B 32 B 15/04
B 25 J 7/00
G 12 B 1/02
C 22 F 1/00

21 Aktenzeichen: 101 42 998.3
22 Anmeldetag: 3. 9. 2001
43 Offenlegungstag: 27. 3. 2003

DE 101 42 998 A 1

71 Anmelder:
Stiftung caesar Center of Advanced European
Studies and Research, 53111 Bonn, DE
74 Vertreter:
Braun-Dullaues Pannen Schrooten Haber, 40470
Düsseldorf

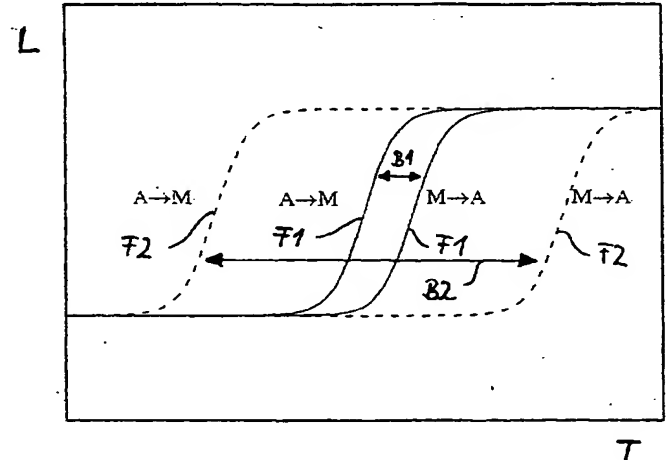
72 Erfinder:
Winzek, Bernhard, Dr., 53173 Bonn, DE
56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
zu ziehende Druckschriften:
DE 40 06 076 C1
DE 26 03 878 C2
DE 199 48 199 A1
DE 197 38 494 A1
DE 100 19 183 A1
DE 695 07 800 T2

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Formgedächtnisverbund mit inhärentem Bewegungsablauf

57 Die Erfindung betrifft einen Formgedächtnisverbund (V), umfassend eine erste Formgedächtnislegierung (F1), die in Abhängigkeit von der Temperatur (T) in einer Martensitphase (M) und/oder in einer Austenitphase (A) vorliegt, wobei der Phasenübergang der Formgedächtnislegierung (F1) bei einer Erwärmung in die Austenitphase (A) bzw. bei einer Abkühlung in die Martensitphase (M) in einer Hystereseschleife erfolgt, welche bezüglich der Temperatur (T) eine Hysteresebreite (B1) hat, und wobei der Formgedächtnisverbund (V) mindestens eine zweite Formgedächtnislegierung (F2) umfaßt, die unmittelbar oder mittelbar mit der ersten Formgedächtnislegierung (F1) verbunden ist, und die in Abhängigkeit von der Temperatur (T) in einer Martensitphase (M) und/oder in einer Austenitphase (A) vorliegt, wobei der Phasenübergang der Formgedächtnislegierung (F2) bei einer Erwärmung in die Austenitphase (A) bzw. bei einer Abkühlung in die Martensitphase (M) in einer Hystereseschleife erfolgt, welche bezüglich der Temperatur (T) eine Hysteresebreite (B2) hat, und wobei die Hysteresebreite (B1) der ersten Formgedächtnislegierung (F1) innerhalb der Hysteresebreite (B2) der zweiten Formgedächtnislegierung (F2) liegt. Der erfindungsgemäße Formgedächtnisverbund (V) kann vorteilhafterweise als Aktor zur Fortbewegung von Objekten eingesetzt werden.



DE 101 42 998 A 1

[0001] Die Erfindung betrifft einen Formgedächtnisverbund, umfassend eine erste Formgedächtnislegierung, die in Abhängigkeit von der Temperatur in einer Martensitphase und/oder in einer Austenitphase vorliegt, wobei der Phasenübergang der Formgedächtnislegierung bei einer Erwärmung in die Austenitphase bzw. bei einer Abkühlung in die Martensitphase in einer Hystereseschleife erfolgt, welche bezüglich der Temperatur eine bestimmte Hysteresebreite hat. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zum Verändern der Form eines derartigen Formgedächtnisverbundes sowie bevorzugte Verwendungen als Aktor bzw. als Antrieb zur Fortbewegung von mechanisch/elektronischen Systemen, insbesondere von Mikrorobotern.

[0002] Derartige Formgedächtnisverbunde sind allgemein bekannt. Formgedächtniswerkstoffe zeichnen sich insbesondere dadurch aus, daß sie in einer Tieftemperaturphase (Martensit) in eine erste Form verformt werden können und daß sie sich nach einer Erwärmung und einer Verformung in einer Hochtemperaturphase (Austenit) und anschließender Abkühlung in der Tieftemperaturphase wieder an diese Formgebung erinnern und die erste Form wieder annehmen.

[0003] Formgedächtnislegierungen durchlaufen eine martensitische Transformation und ändern dabei ihre Kristallstruktur. Mit der Änderung der Struktur ändern sich beim Übergang von der Niedertemperaturphase Martensit zur Hochtemperaturphase Austenit auch die elastischen Eigenschaften des Materials. Wird eine mechanische Bias-Spannung angelegt, so können bei diesem Übergang je nach Randbedingung große Spannungen $\Delta\sigma$ ausgeübt oder große Formänderungen $\Delta\epsilon$ durchlaufen werden.

[0004] Formgedächtnisverbunde, bei denen eine Formgedächtnisschicht auf einem Substrat abgeschieden ist, können auf diese Weise Aktorbewegungen insbesondere in kleinen Mikrosystemen ausführen. Die nötige Bias-Spannung wird durch die Spannung zwischen der Formgedächtnisschicht und dem Substrat gewährleistet, die entsteht, wenn die Formgedächtnisschicht bei hohen Temperaturen kristallisiert und anschließend abkühlt. Hierzu wird im übrigen auf die deutsche Patentanmeldung DE 10 019 183 verwiesen, auf deren Inhalt Bezug genommen wird.

[0005] Formgedächtnislegierungen besitzen ein hohes Arbeitsvermögen, können große Bewegungen bzw. Schrittweiten zurücklegen und sind durch geringe Steuerspannungen direkt über Widerstandsheizung ansteuerbar. Aktoren mit Formgedächtnislegierungen können daher in verschiedenen Bereichen der Technik eingesetzt werden. Sie sind jedoch für Anwendungsfälle der Fortbewegung von Objekten, insbesondere von Mikrorobotern mit dem Nachteil verbunden, daß ihre Bewegungen bei der Auslenkung aus einer Ausgangslage in eine Endlage und danach wieder zurück in die Ausgangslage auf demselben Weg erfolgen. Ein aufgrund einer Auslenkung eines Aktors vorgenommener Fortbewegungsschritt wird dabei wieder rückgängig gemacht, so daß insgesamt eine Fortbewegung des Objektes nicht erfolgen kann.

[0006] Bei der Fortbewegung von Objekten oder Robotern sind verschiedene Antriebe mit wellenartiger Bewegung bekannt. Damit ein Roboter auf dem Land laufen oder im bzw. unter Wasser schwimmen kann, muß er wie der Mensch eine Bewegung durchführen, bei der sich innerhalb eines vollständigen Phasendurchlaufs Hin- und Rückweg voneinander unterscheiden. Würde dieses Prinzip nicht gelten, so würde der Roboter nur hin- und herwackeln.

[0007] Wesentlich für diese wellenartige Fortbewegung ist die phasengekoppelte Ansteuerung unabhängig fungierender Teilaktoren in einem Gesamtsystem. Dieses Arbeit-

sprinzip kann durch stehende oder laufende Wellen in magnetostriktiven oder piezoelektrischen Aktoren erzeugt werden.

[0008] Bei Antrieben mit magnetostriktiven Schichten durch stehende Wellen sind beispielsweise lineare und rotierende Ultraschall-Motoren mit magnetostriktiven Schichten bekannt. Dabei führen die magnetostriktiven Schichten in einem magnetischen Wechselfeld zu einer sinusförmigen Auf- und Abbewegung des Substrats. Entscheidend für die Fortbewegung ist hierbei, daß zahnartige Strukturen senkrecht zum Substrat zwischen Wellenberg und Wellenknoten existieren. Dadurch führen diese Zähne eine ellipsenförmige Bewegung durch. Hin- und Rückweg der Zahnbewegung sind demnach unterschiedlich. Derartige magnetostriktive "Wellen"-Antriebe sind jedoch nur für bestimmte Einsatzbereiche geeignet. Sie konnten sich bisher bei einem konstruktiv hohen Aufwand insbesondere deshalb nicht durchsetzen, da der magnetostriktive Effekt relativ klein ist und die notwendige unmittelbare Nähe eines starken magnetischen Wechselfeldes die Verwendung des Antriebs für Laufbewegungen und Schwimmbewegungen von Robotern verhindert.

[0009] Ferner sind Antriebe mit piezoelektrischen Schichten mittels laufender Wellen bekannt. Das Prinzip der Fortbewegung mittels laufender Wellen in piezoelektrischen Werkstoffen wird beispielsweise in Autofokussystemen in Fotoapparaten bereits kommerziell eingesetzt. Aufgrund der geringen Stellwege von wenigen Mikrometern muß allerdings bei piezoelektrischen Aktoren mit Frequenzen von einigen kHz und hohen Spannungen gearbeitet werden, um nennenswerte Fortbewegungen zu erreichen, was ebenfalls einen hohen konstruktiven Aufwand sowie einen großen Energiebedarf bedingt und eine Vielzahl von Anwendungsbereichen ausschließt.

[0010] Um wellenartige Bewegungen in bisher bekannten Formgedächtnisaktoren herbeizuführen muß der Aktor in einzelne Abschnitte unterteilt werden, die alle einzeln angesteuert werden müssen. Formgedächtnisaktoren werden durch Wärmeübertragung zu Bewegungen angeregt. Da die wellenförmige Ausbreitung von Wärme durch einen Aktor sehr problematisch ist und durch die Umwelteinflüsse leicht gestört werden kann, muß eine wellenartige Bewegung durch die unabhängige Ansteuerung einzelner Aktorkomponenten erzeugt werden. Die Nachteile dieses Antriebs liegen in dem hohen konstruktiven Aufwand, insbesondere in der komplexen Verdrahtung und der phasengekoppelten Ansteuerung der einzelnen Abschnitte, die das Prinzip ebenfalls sehr aufwendig werden läßt.

[0011] Insbesondere in der Raumfahrt- und Unterwassertechnik steigt der Bedarf an lauffähigen bzw. schwimmfähigen Mikrorobotern, deren Bewegung durch einfache Steuersignale koordiniert werden kann. Um den Aufwand an Steuerelektronik auf ein Mindestmaß zu reduzieren, sollten die eingesetzten Aktoren, vom Design und der Materialauswahl bereits so konzipiert sein, daß beispielsweise ein einziges Steuersignal ausreicht, um einen kompletten Bewegungsablauf durchzuführen.

[0012] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, ein konstruktiv einfaches, preiswert herzustellendes, leicht handhabbares und einfach anzusteuernendes Erzeugnis auf der Basis von Formgedächtnislegierungen bereitzustellen, das mit möglichst geringem Energieverbrauch bei der Einwirkung eines Steuerimpulses aus einer Ausgangslage eine Auslenkung über einen bestimmten Weg erfährt und danach einen hiervon verschiedenen Weg zurück in die Ausgangslage nimmt. Insbesondere soll auf diese Weise ein einfacher Mechanismus geschaffen werden, der als leichtes und kleinbauendes Antriebsmittel zur Fortbewegung von technischen

Objekten oder Systemen, vorzugsweise von Mikrorobotern dienen kann.

[0013] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch einen Formgedächtnisverbund nach Anspruch 1 gelöst. Vorteilhaft Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

[0014] Wesentlich bei der erfindungsgemäßen Lösung ist es, daß der Formgedächtnisverbund mindestens eine zweite Formgedächtnislegierung umfaßt, die unmittelbar oder mittelbar mit der ersten Formgedächtnislegierung verbunden ist, und die auch in Abhängigkeit von der Temperatur in einer Martensitphase und/oder in einer Austenitphase vorliegt, wobei ebenfalls der Phasenübergang der Formgedächtnislegierung bei einer Erwärmung in die Austenitphase bzw. bei einer Abkühlung in die Martensitphase in einer Hystereseschleife erfolgt, welche bezüglich der Temperatur eine Hysteresebreite hat, und wobei die Hysteresebreite der ersten Formgedächtnislegierung innerhalb der Hysteresebreite der zweiten Formgedächtnislegierung liegt. Die Hysteresebreite der ersten Formgedächtnislegierung ist dabei schmaler als die Hysteresebreite der zweiten Formgedächtnislegierung.

[0015] Der Hauptvorteil liegt dabei darin, daß der Aktor aufgrund eines einzigen Steuersignals einen Kreisprozess durchläuft, wobei sich Hin- und Rückbewegung so unterscheiden, daß nach vollendetem Kreisprozess eine Nettobewegung des Aktors resultiert. Hierdurch können auf besonders einfache Weise unterschiedliche Fortbewegungen von Objekten, Systemen oder Robotern erreicht werden.

[0016] Die Bewegung des erfindungsgemäßen Aktors mit zwei Formgedächtnislegierungen F1 und F2 mit unterschiedlichen Hysteresebreiten läuft dabei folgendermaßen ab:

Befinden sich beide Legierungen im Martensitzustand und wird die Temperatur erhöht, so geht zunächst die erste Legierung F1 und dann die zweite Legierung F2 in den Austenitzustand über. Beim Abkühlen geht wiederum zunächst die erste Legierung F1 und danach die zweite Legierung F2 in den Martensitzustand über. Während bei der Erwärmungsphase die erste Legierung bereits im Austenitzustand ist, befindet sich die zweite Legierung noch im Martensitzustand. Bei der Abkühlungsphase ist die Situation genau umgekehrt: Die erste Legierung ist bereits im Martensitzustand und die zweite Legierung ist noch im Austenitzustand. Üben nun die Formgedächtnislegierungen Kräfte in unterschiedliche Richtungen aus, so entsteht dadurch der gewünschte Kreisprozess mit unterschiedlichem Bewegungsablauf in der Hin- und Rückbewegung mit abwechselnder Transformationsfolge $F1 \rightarrow F2 \rightarrow F1 \rightarrow F2$.

[0017] Wesentlich ist, daß die Hysteresen der beiden Legierungen nicht hintereinander angeordnet sind, da ein Aktor dabei beim Hin- und Rückweg genau den gleichen Weg mit der Transformationsfolge $F1 \rightarrow F2 \rightarrow F2 \rightarrow F1$ durchlaufen würde. Bei diesem Ablauf kann sich aber keine Nettobewegung ergeben, so daß der Aktor nur für eine Hin- und Herbewegung sorgt und keine Fortbewegung entsteht.

[0018] Die erfindungsgemäße Lösung ermöglicht es somit, wellenförmige Bewegungen von Aktoren auf der Basis von Formgedächtnislegierungen zu erzeugen und damit Mikrorobotern einen Antrieb zu ermöglichen, der sie dazu befähigt, sich mit großen Stellwegen fortzubewegen oder Schwimmbewegungen durchzuführen. Der erfindungsgemäße Formgedächtnisverbund ist bei einfacher Konstruktion preiswert herzustellen, leicht handzuhaben und einfach anzusteuern. Er kann mit sehr geringem Gewicht und bei sehr geringem Platzbedarf auch in Mikrosystemen vielfältig zur Fortbewegung eingesetzt werden.

[0019] Die erfindungsgemäße Ausbildung kann auch

mehrfach ineinander geschachtelt zur Anwendung kommen, wobei sich jeweils die Hysteresen einer Formgedächtnislegierung innerhalb der Hysteresen einer nächsten Formgedächtnislegierung befindet. Auch ist es möglich mehrere Formgedächtnislegierungen unterschiedlicher oder gleicher Hysteresebreiten so miteinander zu kombinieren, daß alle Hysteresen dieser Legierungen innerhalb der Hysteresebreite einer weiteren Formgedächtnislegierung liegen.

[0020] Für bestimmte Zwecke kann auch ein Grenzfall der erfindungsgemäßen Lösung zum Einsatz kommen, bei dem entweder nur die Phasentransformation vom Martensit zum Austenit oder umgekehrt nur die Phasentransformation vom Austenit zum Martensit bei beiden Formgedächtnislegierungen auf den gleichen Temperaturbereich fällt. Der Temperaturbereich der jeweils anderen Phasentransformation ist jedoch auch hierbei so zu wählen, daß die Hysteresen der Legierung mit schmalerer Hysteresebreite insgesamt innerhalb der breiteren Hysteresen der anderen Legierung liegt.

[0021] Um besonders große Bewegungen bzw. Schrittweiten zu erreichen wird vorgeschlagen, daß Mittel zum Aufbringen einer Kraft bzw. einer Spannung auf eine oder auf beide Formgedächtnislegierung(en) vorgesehen sind. Diese Mittel können beispielsweise durch eine Feder gebildet sein.

[0022] Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung sind die erste Formgedächtnislegierung und die zweite Formgedächtnislegierung jeweils auf einem Substrat mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten aufgebracht, der unterschiedlich ist zu dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Formgedächtnislegierungen. Bei einer Temperaturänderung bringt das Substrat hierbei die für eine große Verformung bzw. Bewegung erforderlichen Kräfte bzw. Spannungen auf. In Abhängigkeit von der Temperatur ändert sich die Spannung in der auf ein Substrat abgeschiedenen Formgedächtnisschicht, wodurch es zu einem Bimetalleffekt kommt. Hierbei ist mit den unterschiedlichen Spannungswerten eine Änderung der Krümmung des Formgedächtnisverbundes verbunden. Ist die Formgedächtnisschicht im Austenitzustand, so befindet sich der Formgedächtnisverbund in einem gekrümmten Zustand. Liegt die Formgedächtnisschicht dagegen im Martensitzustand vor, so befindet sich der Formgedächtnisverbund in einem nahezu planaren Zustand, da durch die Bildung orientierter Martensitvarianten die Schichtverbundspannung auf einen relativ niedrigen Wert reduziert wird.

[0023] Es ist jedoch nicht zwingend, daß ein Aktor im Austenitzustand gekrümmt und im Martensitzustand eben ist. Durch Überlagerung eines Bimetalleffekts mittels einer dritten Schicht in einem Formgedächtnisverbund kann eine Ausgangskrümmung bzw. eine Offset-Krümmung erreicht werden, womit die Flexibilität des Verbundes bezüglich seiner Einsatzmöglichkeiten erhöht wird.

[0024] Besonders vorteilhaft ist es dabei, wenn die erste Formgedächtnislegierung und die zweite Formgedächtnislegierung auf demselben Substrat aufgebracht sind. Durch die Verwendung nur eines einzigen Substrats kann eine besonders einfache Konstruktion erreicht werden.

[0025] Vorteilhafterweise kann das Substrat ein Metall, ein Halbmetall, ein Polymer oder eine Keramik sein. Vorzugsweise wird vorgeschlagen, daß das Substrat aus oder mit Stahl, Molybdän (Mo), Silizium (Si), Siliziumcarbid (SiC), Siliziumdioxid (SiO₂) oder Siliziumnitrid (Si₃N₄) gebildet ist.

[0026] Besonders kleinbauende und leichte Konstruktionen können dadurch erhalten werden, daß das Substrat in Form eines Streifens oder einer Schicht ausgebildet ist. Ebenfalls ist es diesbezüglich von Vorteil, wenn auch die erste Formgedächtnislegierung und/oder die zweite Formge-

dächtnislegierung in Form eines Streifens oder einer Schicht ausgebildet ist.

[0027] Die beiden Formgedächtnislegierungen können dabei vorzugsweise in einem Schichtverbund kombiniert sein. In einer konstruktiv besonders einfachen Ausführungsform kann der Formgedächtnisverbund dabei einen Schichtverbund bilden, der aus einer einzigen Substratschicht und genau zwei Formgedächtnisschichten besteht. Vorzugsweise wird vorgeschlagen, daß die Dicken der beiden Formgedächtnisschichten zumindest annähernd gleich groß sind.

[0028] Besonders vorteilhaft ist es ferner, wenn das Substrat einen oder mehrere Bereiche aufweist, in dem bzw. in denen nicht alle, sondern nur eine Teilanzahl aller Formgedächtnislegierungen, vorzugsweise nur eine Formgedächtnislegierung aufgebracht ist. Hierdurch kann bei einfacher Konstruktion ein wellenförmiger Bewegungsablauf erzielt werden.

[0029] Vorzugsweise ist dabei an jeder Stelle des Substrats jeweils nur eine Teilanzahl aller Formgedächtnislegierungen, insbesondere nur eine einzige Formgedächtnislegierung aufgebracht. Auch kann es Bereiche des Substrats geben, in denen keine Formgedächtnislegierung aufgebracht ist.

[0030] Gemäß einer weiteren besonders vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung ist das Substrat durch einen Streifen gebildet, der in zwei oder mehr Abschnitte aufgeteilt ist, wobei in einem ersten Abschnitt auf einer Oberfläche (Oberseite) des Streifens die erste Formgedächtnislegierung aufgebracht ist und in dem zweiten Abschnitt auf der anderen Oberfläche (Unterseite) des Streifens die zweite Formgedächtnislegierung aufgebracht ist. Ein derartiger Aktor kann besonders gut für Laufbewegungen oder für Schwimmbewegungen eingesetzt werden.

[0031] Für bestimmte Einsatzbereiche kann es vorteilhaft sein, wenn der erfindungsgemäße Formgedächtnisverbund zusätzliche Schichten aufweist, die vorzugsweise aus Werkstoffen bestehen, die eine höhere Elastizität haben als die Formgedächtnislegierungen und/oder das Substrat. Insbesondere kann hierdurch eine gewünschte Ausgangsform des Aktors vorgegeben werden.

[0032] Vorzugsweise kann der Formgedächtnisverbund außenseitig von einer Polymerschicht umgeben sein, um beispielsweise einen Schutz vor Umgebungseinflüssen zu erreichen.

[0033] In besonders bevorzugten Ausführungsformen bestehen die Formgedächtnislegierungen aus Legierungen mit Titan (Ti) und Nickel (Ni), insbesondere aus TiNi, Ti(Ni, Cu), Ti(Ni, Fe), Ti(Ni, Pd), Ti(Ni, Au), (Ti, Hf) Ni oder (Ti, Zr)Ni. Auch können die Formgedächtnislegierungen Legierungen auf der Basis von Kupfer, insbesondere CuZnAl oder CuNiAl sein.

[0034] Die Eigenschaften dieser Legierungen können dabei durch die Zugabe bestimmter Legierungselemente gezielt beeinflußt werden. So lassen sich durch die sukzessive Substitution von Ni durch Pd oder die Substitution von Ti durch Hf die Übergangstemperaturen der Formgedächtnisschichten auf Temperaturen von bis zu 500°C erhöhen. Durch die Substitution von Ni durch Fe lassen sich die Übergangstemperaturen dagegen verringern. Damit ist es möglich, die Übergangstemperaturen in einem weiten Bereich einzustellen.

[0035] Die Hysteresebreite bezüglich der Temperatur hängt ebenfalls von den beigefügten Substituenten ab, so daß auch die Hysteresebreite durch geeignete Wahl der Formgedächtnislegierung eingestellt werden kann. Dabei erhöht die Ni/Nb- und die Ti/Hf-Substitution die Hysteresebreite, während die Ni/Cu-Substitution diese verringert.

[0036] Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zum Ver-

ändern der Form eines Formgedächtnisverbundes der vorangehend beschriebenen Art. Gemäß diesem Verfahren wird die Form des Schichtverbundes dadurch verändert, daß der Formgedächtnisverbund erwärmt oder abgekühlt wird.

[0037] Insbesondere kann ein erfindungsgemäßer Formgedächtnisverbund mit diesem Verfahren derart in seiner Form verändert werden, daß er in einem Kreisprozeß von einer Ausgangsform zu einer Endform und zurück zu der Ausgangsform verformt wird, indem der Formgedächtnisverbund zunächst erwärmt und danach abgekühlt wird.

[0038] Auf besonders einfache Weise kann die Erwärmung des Formgedächtnisverbundes durch die Zufuhr von elektrischem Strom herbeigeführt werden.

[0039] Auf diese Weise läßt sich ein erfindungsgemäßer Formgedächtnisverbund insbesondere auch in keinen Mikrosystemen als Aktor zur Umwandlung von thermischer und/oder elektrischer Energie in mechanische Arbeit oder als Aktor zur Fortbewegung von mechanisch/elektronischen Systemen einsetzen.

[0040] Weitere Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung und den in den Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispielen.

[0041] Es zeigen:

[0042] Fig. 1 schematisches Spannung-Dehnungs-Diagramm einer Formgedächtnislegierung im Martensit- und Austenitzustand

[0043] Fig. 2 Spannung-Temperatur-Diagramm eines Formgedächtnisverbundes mit großer Hysteresebreite

[0044] Fig. 3 Spannung-Temperatur-Diagramm eines Formgedächtnisverbundes mit schmaler Hysteresebreite

[0045] Fig. 4 Auslenkung-Temperatur-Diagramm zweier Formgedächtnisverbunde

[0046] Fig. 5 Querschnitt durch einen erfindungsgemäßen Aktor

[0047] Fig. 6 Schematische Darstellung des Auslenkung-Temperatur-Verlaufs des Aktors aus Fig. 5

[0048] Fig. 7 Gemessener Auslenkung-Temperatur-Verlauf des Aktors aus Fig. 5

[0049] Fig. 8 Querschnitt durch einen Aktor für Laufbewegungen

[0050] Fig. 9 Bewegungsablauf des Aktors aus Fig. 8 bei einer Laufbewegung

[0051] Fig. 10 Querschnitt durch einen Aktor für Schwimmbewegungen

[0052] Fig. 11 Bewegungsablauf des Aktors aus Fig. 10 bei einer Schwimmbewegung

[0053] In Fig. 1 ist schematisch dargestellt, wie sich beim Übergang von der Niedertemperaturphase Martensit M zur Hochtemperaturphase Austenit A die elastischen Eigenschaften einer Formgedächtnislegierung ändern. Hierbei ist die Spannung σ über der Dehnung ϵ aufgetragen. Als Formgedächtnislegierung für einen erfindungsgemäßen Schichtverbund V kann dabei insbesondere eine Titan-Nickel-Basis-Legierung verwendet werden, beispielsweise TiNi, Ti(Ni, Cu), Ti(Ni, Fe), Ti(Ni, Pd), Ti(Ni, Au), (Ti, Hf)Ni oder (Ti, Zr)Ni.

[0054] Das Spannung-Temperatur-Diagramm in Fig. 2 zeigt die Veränderung der Schichtspannung σ (in MPa) in Abhängigkeit von der Temperatur T (in °C) bei einer TiNi-Formgedächtnisschicht F2, die auf ein Substrat S aus Molybdän abgeschieden wurde. Die aufgenommenen Werte ergeben sich bei einer 2 µm dicken Ti₄₈Hf₈Ni₄₄-Formgedächtnisschicht auf einem 100 µm dicken Molybdän-Substrat S nach einer einstündigen Glühung bei 600°C. Die angegebenen Übergangstemperaturen bezeichnen die Martensitstarttemperatur M_s, die Martensitendtemperatur M_f, die Austenitstarttemperatur A_s und die Austenitendtemperatur A_f.

[0055] Aufgrund des geringen Ausdehnungskoeffizienten

von Molybdän entsteht nach dem Glühen eine Zugspannung von ca. 600 MPa, die unterhalb von 30°C durch die Orientierung der Martensitvarianten um ca. 500 MPa reduziert wird. Beim Erwärmen wird durch die Rücktransformation bei ca. 60°C die Schichtspannung wieder aufgebaut. Mit den unterschiedlichen Spannungswerten σ ist zugleich eine Änderung der Krümmung des aus der Formgedächtnisschicht F2 und dem Substrat S bestehenden Formgedächtnisverbundes V verbunden.

[0056] Die Hysteresebreite bezüglich der Temperatur kann durch Variationen in den der Formgedächtnislegierung beigefügten Legierungselementen beeinflusst werden. So zeigt das Spannung-Temperatur-Diagramm in Fig. 3 die Veränderung der Schichtspannung σ (in MPa) in Abhängigkeit von der Temperatur T (in °C) bei einer 2 µm dicken $\text{Ti}_{55}\text{Ni}_{30}\text{Cu}_{15}$ -Formgedächtnisschicht F1 auf einem 100 µm dicken Molybdän-Substrat S nach einer einstündigen Glühung bei 600°C. Die Breite der Hysterese bezüglich der Temperatur ist dabei deutlich geringer als in Fig. 2.

[0057] In Fig. 4 sind die Auslenkungs-Temperatur-Kurven zweier verschiedener Formgedächtnislegierungen F1 und F2 mit den Eigenschaften gemäß den Fig. 2 und 3 einander gegenübergestellt. Die Transformationen von Austenit zu Martensit sind dabei mit $A \rightarrow M$ und die Phasenumwandlungen von Martensit zu Austenit mit $M \rightarrow A$ gekennzeichnet. Erfindungsgemäß sind hierbei zwei Formgedächtnislegierungen F1 und F2 unterschiedlicher Hysteresebreite B1, B2 so miteinander kombiniert, daß die Hysterese der Legierung F1 mit einer schmaleren Hysteresebreite B1 innerhalb der weiteren Breite B2 der Hysterese der Legierung F2 liegt.

[0058] Die Auswirkung der Transformationsfolge $F1 \rightarrow F2 \rightarrow F1 \rightarrow F2$ auf die Auslenkung L von Aktoren läßt sich meßtechnisch überprüfen, wenn ein Aktor betrachtet wird, der aus einem Schichtverbund V gemäß Fig. 5 besteht. Der Schichtverbund V besteht aus drei Schichten S, F1, F2. Zwei der Schichten F1 und F2 sind Formgedächtnislegierungen. Zwischen diesen beiden Formgedächtnisschichten F1 und F2 befindet sich das Substrat S. Im einfachsten und deutlichsten Fall sind die Schichtdicken der beiden Formgedächtnisschichten gerade gleich groß. Die Formgedächtnislegierung F1 besitzt dabei eine schmale Hysterese und die Formgedächtnislegierung F2 eine breite Hysterese.

[0059] Entsprechend der vorangegangenen Beschreibung stehen die Schichten F1, F2 aus Formgedächtnislegierungen auf Substraten S mit niedrigerem thermischen Ausdehnungskoeffizienten im Austenitzustand A unter einer großen Zugspannung und im Martensitzustand M unter einer wesentlich geringeren Zugspannung. Die Schichtfolge aus Formgedächtnislegierung F1, einem passiven Substrat S und Formgedächtnislegierung F2 hat zur Folge, daß die gegenüberliegenden Formgedächtnisschichten F1, F2 im Austenitzustand A das Substrat S jeweils auf Ihre Seite ziehen wollen. Sind beide Schichten F1 und F2 im Martensitzustand M oder im Austenitzustand A haben sich die Zugspannungen gerade auf und der Aktor bleibt flach. Ist dagegen nur eine der beiden Formgedächtnisschichten F1 oder F2 im Austenitzustand A, so überwiegt ihre Zugspannung und der Aktor wird in deren Richtung ausgelenkt.

[0060] Da sich dabei erfindungsgemäß die Hysterese der Formgedächtnisschicht F1 innerhalb der Hysterese der anderen Formgedächtnisschicht F2 befindet, kommt das in Fig. 6 skizzierte Auslenkungsverhalten des Aktors zustande. Hinweg (oben) und Rückweg (unten) besitzen hierbei einen deutlich unterschiedlichen Verlauf.

[0061] In Fig. 7 ist dazu der gemessene Verlauf der Auslenkung eines solchen Schichtverbundes V gezeigt. Der Schichtverbund V besteht hier aus einem Molybdän-Sub-

strat der Dicke 100 µm und zwei Formgedächtnisschichten aus $\text{Ti}_{55}\text{Ni}_{30}\text{Cu}_{15}$ und $\text{Ti}_{49}\text{Hf}_9\text{Ni}_{42}$ mit einer Dicke von jeweils 2,7 µm.

[0062] Fig. 8 zeigt ein besonders bevorzugtes Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Aktors, der für Laufbewegungen eingesetzt werden kann. Der Aktor entspricht im wesentlichen dem streifenförmigen Aktor aus Fig. 5, wobei jedoch die beiden Formgedächtnislegierungen F1 und F2 mit unterschiedlicher Hysteresebreite B1 und B2 auf zwei verschiedene Abschnitte A1 und A2 aufgeteilt sind. In dem ersten Abschnitt A1 ist die erste Formgedächtnislegierung F1 auf der Unterseite des Substratstreifens S aufgebracht und in dem zweiten Abschnitt A2 ist die zweite Formgedächtnislegierung F2 auf der Oberseite des Substratstreifens S aufgebracht.

[0063] Die mit diesem Aktor möglichen Bewegungsformen sind in der Fig. 9 in fünf Teilschritten 1) bis 5) dargestellt.

[0064] Bei der in Fig. 9 gezeigten Laufbewegung ist der Aktor aus Fig. 8 senkrecht nach unten an einem Objekt O angeordnet, das ein mechanisch/elektronisches System, insbesondere ein Mikroroboter sein kann. Befinden sich beide Formgedächtnislegierungen F1 und F2 im Martensitzustand M, so steht das Objekt O gemäß Teilschritt 1 auf dem Boden B.

[0065] Die anschließend erfolgende Krümmung der unteren Hälfte bzw. des Abschnitts A1 mit der Legierung F1 nach rechts führt zum Abstoßen und damit zu einer Bewegung des Objekts O nach links (Teilschritt 2). Der Pfeil P zeigt dabei den Moment der Abstoßung. In dieser Zwischenlage des Aktors befindet sich die Legierung F1 im Austenitzustand A und die Legierung F2 noch im Martensitzustand M.

[0066] Die zweite Legierung F2 gewährleistet anschließend eine Rückbewegung des Aktors ohne Bodenkontakt, sofern weitere Aktoren, insbesondere weitere Beine des Roboters in diesem Moment den Bodenkontakt und damit das Gewicht des Objekts O übernehmen. Nachdem auch die obere Hälfte bzw. der Abschnitt A2 mit der zweiten Legierung F2 gekrümmt ist und beide Formgedächtnislegierungen F1 und F2 im Austenitzustand A sind (Teilschritt 3), verformt sich der untere Abschnitt mit der Legierung F1 wieder in die Ausgangslage zurück (Teilschritt 4). In dieser zweiten Zwischenlage des Aktors befindet sich die Legierung F1 schon wieder im Martensitzustand M, während die Legierung F2 noch im Austenitzustand A ist.

[0067] Abschließend verformt sich auch der obere Abschnitt mit der Legierung F2 wieder in die Ausgangslage zurück (Teilschritt 5), so daß sich der Aktor insgesamt wieder in der Ausgangsposition befindet und beide Legierungen F1 und F2 wieder im Martensitzustand M sind. Der Kreisprozeß des Bewegungsablaufes ist damit einmal durchlaufen und kann für weitere Laufschrte wiederholt werden.

[0068] Fig. 10 zeigt ein besonders bevorzugtes Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Aktors, der für Schwimmbewegungen eingesetzt werden kann. Der Aktor entspricht im wesentlichen dem streifenförmigen Aktor aus Fig. 8, wobei jedoch beide Formgedächtnislegierungen F1 und F2 mit unterschiedlicher Hysteresebreite B1 und B2 in den beiden Abschnitten A1 und A2 auf der gleichen Seite des Substratstreifens S aufgebracht sind.

[0069] Bei der in Fig. 11 dargestellten Schwimmbewegung sind zwei Aktoren gemäß Fig. 10 seitlich einander gegenüberliegend an einem Objekt C) angeordnet, das wiederum ein mechanisch/elektronisches System, insbesondere ein Mikroroboter sein kann. In dieser Darstellung sind die beiden Aktoren derart angeordnet, daß sich beide Formgedächtnislegierungen F1 und F2 auf der Unterseite des Sub-

stratstreifens S befinden. Die mit den Aktoren möglichen Bewegungsformen sind in der Fig. 11 in fünf Teilschritten 1) bis 5) dargestellt.

[0070] Für einen Akteur für Schwimmbewegungen gelten die gleichen Kriterien wie für den zuvor beschriebenen Akteur für Laufbewegungen. Auch hier gilt, daß die Spannweite des Aktors bei der Vorwärtsbewegung (Teilschritte 1 → 2 → 3) möglichst groß sein soll, während für die Rückbewegung (Teilschritte 3 → 4 → 5) die Spannweite möglichst klein sein muß. Allerdings ist es bei einer Schwimmbewegung sinnvoll, daß in der Ausgangslage 1) in Fig. 11 beide Legierungen F1 und F2 im Martensitzustand M sind und daß beide Formgedächtnislegierungen F1 und F2 bei ihrer ersten Verformung in die gleiche Richtung (nach unten) arbeiten. Der gekrümmte Martensitzustand M des Akteurabschnitts A1 von Legierung F1 kann dadurch erreicht werden, daß mittels einer dritten Schicht ein Bimetalleffekt überlagert wird, der es ermöglicht, die gewünschte Offset-Krümmung zu erzeugen. Diese dritte Schicht kann in dem in Fig. 11 dargestellten Beispiel vorteilhafterweise auf der Oberseite des Substratstreifens S vorgesehen sein.

[0071] Zunächst befinden sich in der Ausgangslage 1) beide Formgedächtnislegierungen F1 und F2 im Martensitzustand M, wobei beide Aktoren nach oben gerichtet sind. Die Verformung bzw. Streckung der inneren Hälfte bzw. des Abschnitts A1 mit der Legierung F1 nach unten führt zu einer Schwimmbewegung des Objekts O nach oben. Die Pfeile P1 und P2 zeigen dabei die von den Abschnitten A1 bzw. A2 ausgeübten Vortriebskräfte. In dieser Zwischenlage 2) der Aktoren befindet sich die Legierung F1 im Austenitzustand A und die Legierung F2 noch im Martensitzustand M. Beide Legierungen F1 und F2 sind hierbei gerade gestreckt.

[0072] Anschließend verformt bzw. krümmt sich auch die äußere Hälfte bzw. der Abschnitt mit der zweiten Legierung F2 nach unten, wobei eine weitere Schwimmbewegung des Objekts O nach oben erfolgt. Die Pfeile P2 zeigen dabei die von den Abschnitten A2 ausgeübten Vortriebskräfte. Beide Formgedächtnislegierungen F1 und F2 sind in dieser Endlage 3 nunmehr im Austenitzustand A.

[0073] Anschließend verformt sich der innere Abschnitt mit der Legierung F1 wieder in die Ausgangslage zurück. In dieser zweiten Zwischenlage 4) der Aktoren befindet sich die Legierung F1 schon wieder im Martensitzustand M, während die Legierung F2 noch im Austenitzustand A ist. Beide Legierungen F1 und F2 befinden sich hierbei in einer gekrümmten Lage.

[0074] Abschließend verformt sich auch der äußere Abschnitt mit der Legierung F2 wieder in die Ausgangslage 5) zurück, so daß sich beide Aktoren insgesamt wieder in der Ausgangsposition befindet und beide Legierungen F1 und F2 wieder im Martensitzustand M sind. Der Kreisprozeß des Bewegungsablaufes ist damit einmal durchlaufen und kann für weitere Schwimmschritte wiederholt werden.

Bezugszeichenliste

M Martensit
A Austenit
σ Spannung
ε Dehnung
V Schichtverbund, Formgedächtnisverbund
T Temperatur
S Substrat
M_s Martensitstarttemperatur
M_f Martensitendtemperatur
A_s Austenitstarttemperatur
A_f Austenitendtemperatur

F1 erste Formgedächtnislegierung, Formgedächtnisschicht
F2 zweite Formgedächtnislegierung, Formgedächtnisschicht

I. Auslenkung

5 B1 Hysteresebreite der ersten Formgedächtnislegierung

B2 Hysteresebreite der zweiten Formgedächtnislegierung

A1 erster Abschnitt

A2 zweiter Abschnitt

O Objekt

10 B Boden

P Moment der Abstoßung

P1 Vortriebskraft

P2 Vortriebskraft

Patentansprüche

1. Formgedächtnisverbund (V), umfassend eine erste Formgedächtnislegierung (F1), die in Abhängigkeit von der Temperatur (T) in einer Martensitphase (M) und/oder in einer Austenitphase (A) vorliegt,

wobei der Phasenübergang der Formgedächtnislegierung (F1) bei einer Erwärmung in die Austenitphase (A) bzw. bei einer Abkühlung in die Martensitphase (M) in einer Hystereseschleife erfolgt, welche bezüglich der Temperatur (T) eine Hysteresebreite (B1) hat, **dadurch gekennzeichnet**,

daß der Formgedächtnisverbund (V) mindestens eine zweite Formgedächtnislegierung (F2) umfaßt, die unmittelbar oder mittelbar mit der ersten Formgedächtnislegierung (F1) verbunden ist,

und die in Abhängigkeit von der Temperatur (T) in einer Martensitphase (M) und/oder in einer Austenitphase (A) vorliegt,

wobei der Phasenübergang der Formgedächtnislegierung (F2) bei einer Erwärmung in die Austenitphase (A) bzw. bei einer Abkühlung in die Martensitphase (M) in einer Hystereseschleife erfolgt, welche bezüglich der Temperatur (T) eine Hysteresebreite (B2) hat, und wobei die Hysteresebreite (B1) der ersten Formgedächtnislegierung (F1) innerhalb der Hysteresebreite (B2) der zweiten Formgedächtnislegierung (F2) liegt.

2. Formgedächtnisverbund nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß entweder die Phasentransformation vom Martensit (M) zum Austenit (A) oder umgekehrt vom Austenit (A) zum Martensit (M) bei beiden Formgedächtnislegierungen (F1, F2) auf den gleichen Temperaturbereich fällt.

3. Formgedächtnisverbund nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß Mittel zum Aufbringen einer Kraft bzw. einer Spannung (σ) auf mindestens eine Formgedächtnislegierung (F1, F2) vorgesehen sind.

4. Formgedächtnisverbund nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Formgedächtnislegierung (F1) und die zweite Formgedächtnislegierung (F2) jeweils auf einem Substrat (S) aufgebracht sind, das einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten hat, der unterschiedlich ist zu dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Formgedächtnislegierungen (F1, F2).

5. Formgedächtnisverbund nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Formgedächtnislegierung (F1) und die zweite Formgedächtnislegierung (F2) auf demselben Substrat (S) aufgebracht sind.

6. Formgedächtnisverbund nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat (S) ein Metall, ein Halbmetall, ein Polymer oder eine Keramik ist.

7. Formgedächtnisverbund nach Anspruch 6, dadurch

gekennzeichnet, daß das Substrat aus oder mit Stahl, Molybdän (Mo), Silizium (Si), Siliziumcarbid (SiC), Siliziumdioxid (SiO₂) oder Siliziumnitrid (Si₃N₄) gebildet ist.

8. Formgedächtnisverbund nach einem der Ansprüche 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat (S) in Form eines Streifens oder einer Ebene ausgebildet ist.

9. Formgedächtnisverbund nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Formgedächtnislegierung (F1) und/oder die zweite Formgedächtnislegierung (F2) in Form eines Streifens oder einer Schicht ausgebildet ist.

10. Formgedächtnisverbund nach den Ansprüchen 5, 8 und 9, dadurch gekennzeichnet, daß genau zwei Formgedächtnislegierungen (F1, F2) mit einer Substratschicht (S) in einem Schichtverbund (V) kombiniert sind.

11. Formgedächtnisverbund nach einem der Ansprüche 5 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat (S) mindestens einen Bereich (A1, A2) aufweist, in dem nur eine Teilanzahl aller Formgedächtnislegierungen (F1, F2), vorzugsweise nur eine Formgedächtnislegierung (F1, F2) aufgebracht ist.

12. Formgedächtnisverbund nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß an jeder Stelle des Substrats (S) jeweils maximal eine Teilanzahl aller Formgedächtnislegierungen (F1, F2), vorzugsweise nur eine Formgedächtnislegierung (F1, F2) aufgebracht ist.

13. Formgedächtnisverbund nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat (S) durch einen Streifen gebildet ist, der zwei Abschnitte (A1, A2) aufweist, wobei in dem ersten Abschnitt (A1) auf der Oberseite oder Unterseite des Streifens die erste Formgedächtnislegierung (F1) aufgebracht ist und in dem zweiten Abschnitt (A2) auf der Oberseite oder Unterseite des Streifens die zweite Formgedächtnislegierung (F2) aufgebracht ist.

14. Formgedächtnisverbund nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzliche Schichten vorgesehen sind, die vorzugsweise aus Werkstoffen bestehen, die eine höhere Elastizität haben als die Formgedächtnislegierungen (F1, F2) und/oder das Substrat (S).

15. Formgedächtnisverbund nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß er außenseitig von einer Polymerschicht umgeben ist.

16. Formgedächtnisverbund nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Formgedächtnislegierungen (F1, F2) Legierungen mit Titan (Ti) und Nickel (Ni), insbesondere TiNi, Ti(Ni, Cu), Ti(Ni, Fe), Ti(Ni, Pd), Ti(Ni, Au), (Ti, Hf)Ni oder (Ti, Zr)Ni sind.

17. Formgedächtnisverbund nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Formgedächtnislegierungen (F1, F2) Legierungen auf der Basis von Kupfer, insbesondere CuZnAl oder CuNiAl sind.

18. Verfahren zum Verändern der Form eines Formgedächtnisverbundes (V) nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Formgedächtnisverbund (V) erwärmt oder abgekühlt wird.

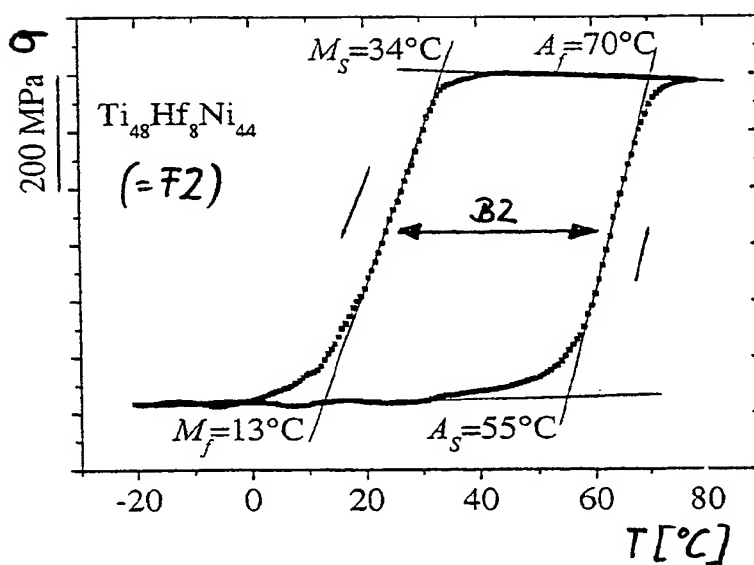
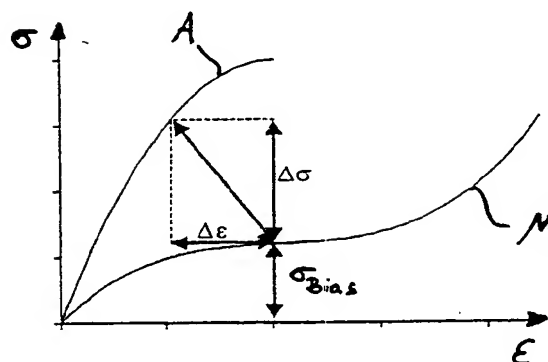
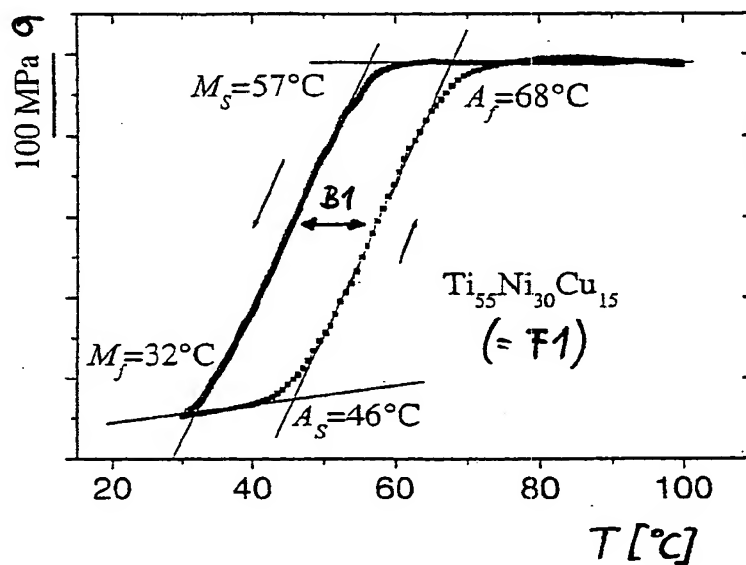
19. Verfahren zum Verändern der Form eines Formgedächtnisverbundes (V) nach einem der vorherigen Ansprüche von einer Ausgangsform zu einer Endform und zurück zu der Ausgangsform in einem Kreisprozeß, dadurch gekennzeichnet, daß der Formgedächtnisverbund (V) erwärmt und danach abgekühlt wird.

20. Verfahren nach Anspruch 18 oder 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Erwärmung durch elektrischen Strom herbeigeführt wird.

21. Verwendung eines Formgedächtnisverbundes (V) nach einem der Ansprüche 1 bis 17, insbesondere unter Anwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 18 bis 20, als Aktor zur Umwandlung thermischer und/oder elektrischer Energie in mechanische Arbeit.

22. Verwendung eines Formgedächtnisverbundes (U) nach einem der Ansprüche 1 bis 17, insbesondere unter Anwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 18 bis 20, als Aktor zur Fortbewegung von mechanisch/elektronischen Systemen.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

Fig. 1Fig. 2Fig. 3

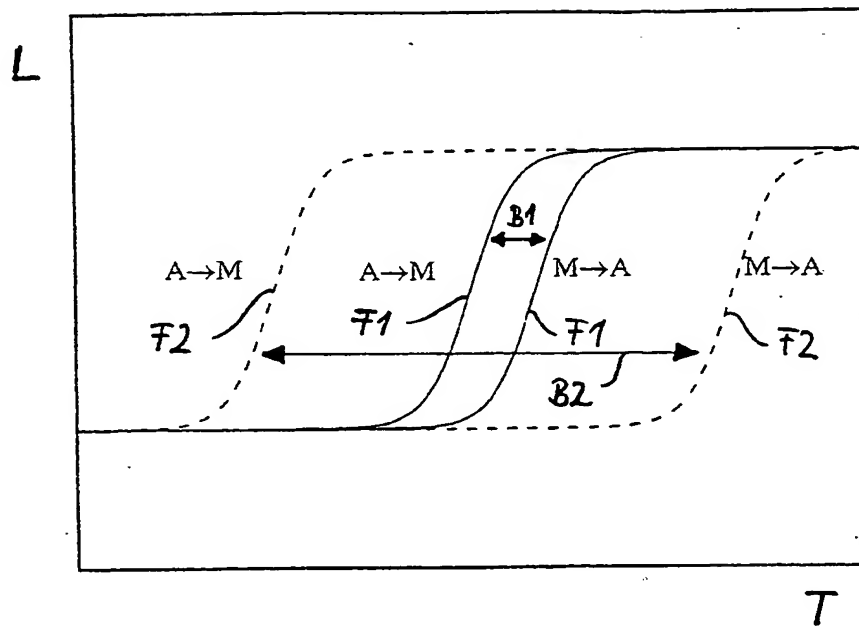


Fig. 4

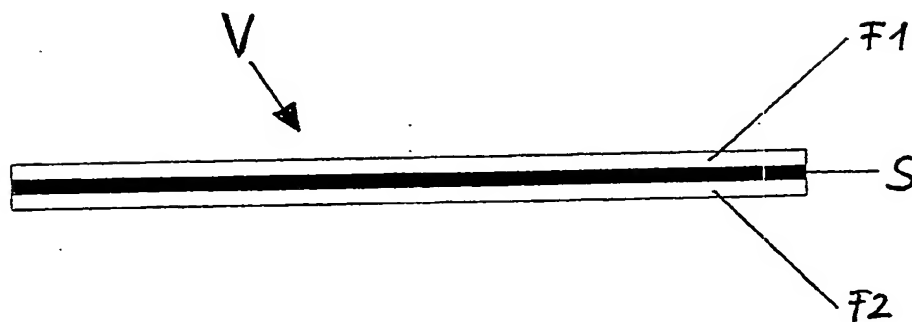


Fig. 5

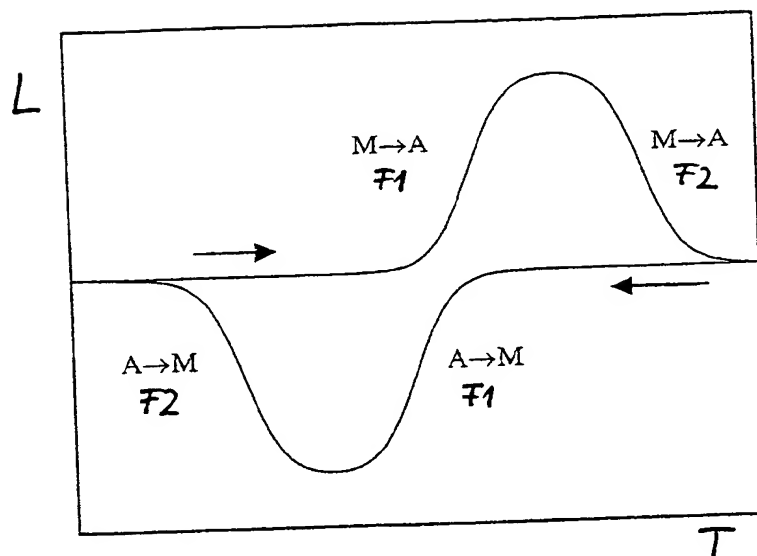


Fig. 6

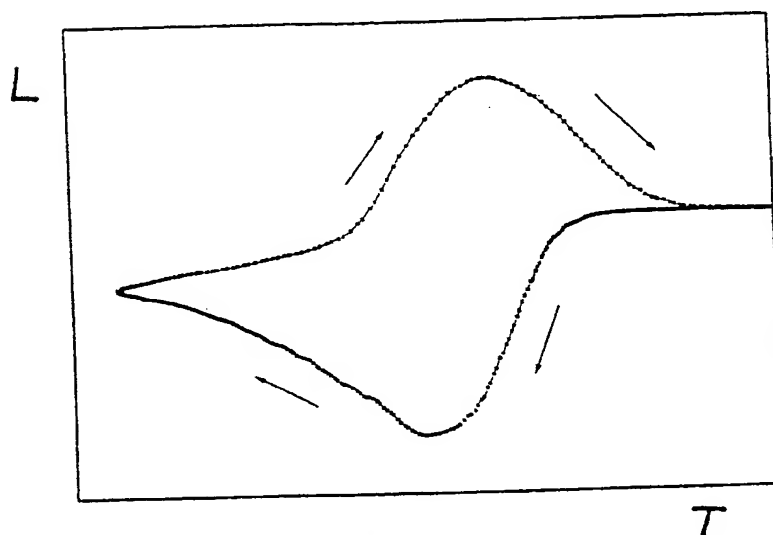


Fig. 7

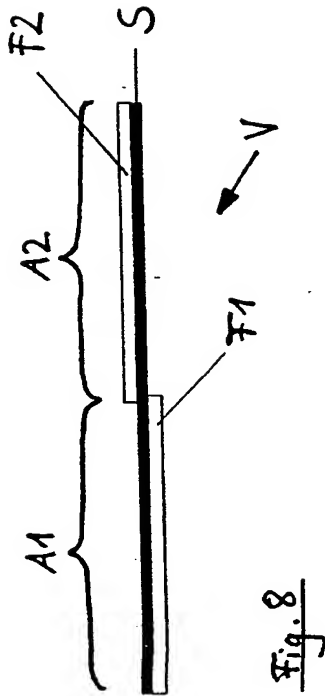


Fig. 8

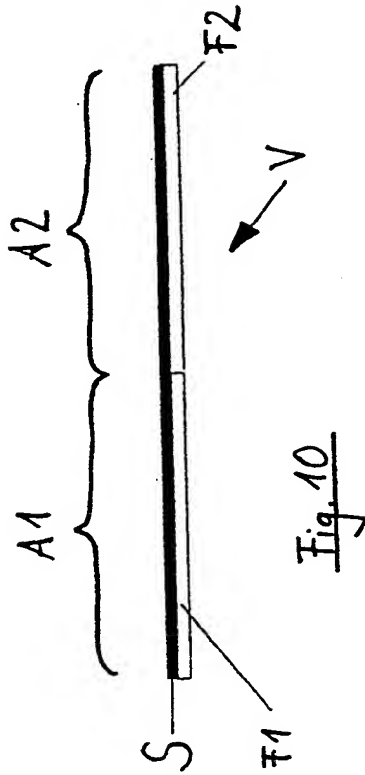


Fig. 10

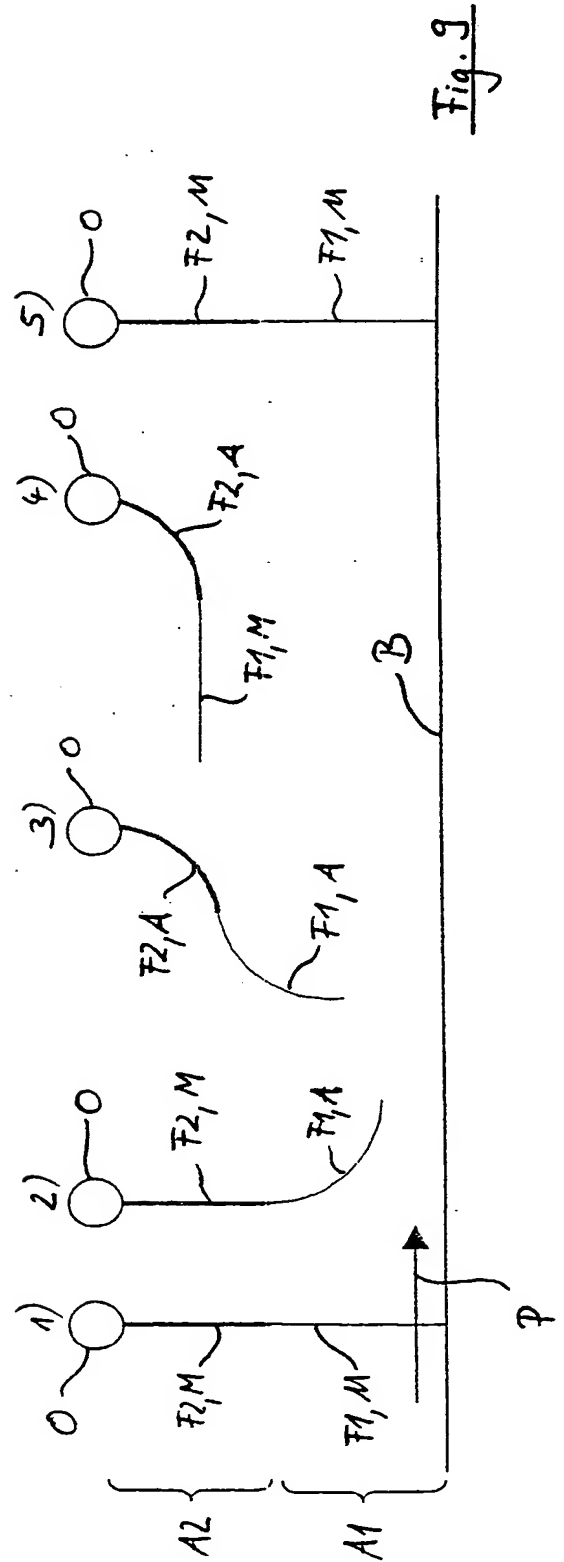


Fig. 9

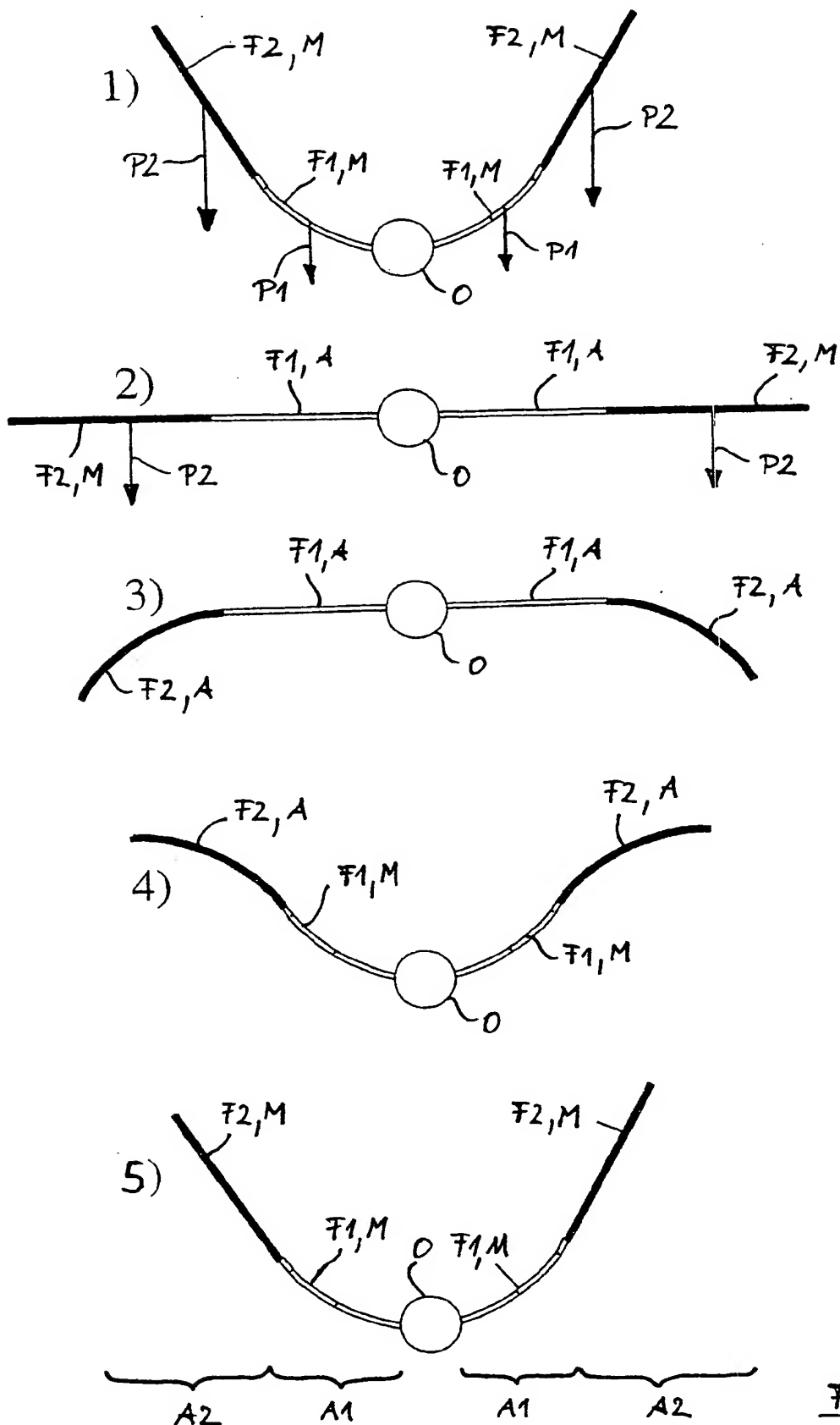


Fig. 11